

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2001-253883  
(P2001-253883A)

(43) 公開日 平成13年9月18日 (2001.9.18)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード (参考)
C 0 7 D 487/22		C 0 7 D 487/22	4 C 0 5 0
C 0 8 G 79/00		C 0 8 G 79/00	4 J 0 3 0
H 0 1 B 1/12		H 0 1 B 1/12	Z 5 F 0 5 1
H 0 1 L 31/04		H 0 1 L 31/04	Z

審査請求 有 請求項の数16 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2000-68766(P2000-68766)

(22) 出願日 平成12年3月13日 (2000.3.13)

(71) 出願人 598169457

奈良先端科学技術大学院大学長  
奈良県生駒市高山町8916-5

(72) 発明者 小夫家 芳明

奈良県生駒市高山町8916-5 大学宿舍D  
-107

(72) 発明者 小川 和也

奈良県生駒市高山町8916-12 高山サイエ  
ンスプラザ407号

(74) 代理人 100058479

弁理士 鈴江 武彦 (外5名)

最終頁に続く

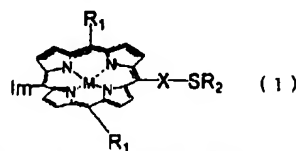
(54) 【発明の名称】 新規なメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体及びこれを繰り返し単位として有する重合体並びにこれらの製造方法

(57) 【要約】

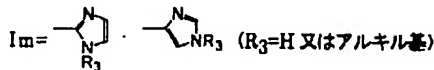
【課題】 人工光合成および新規な太陽電池材料へ応用展開することのできるナノメートル単位の極めて微小な光エネルギー、電子エネルギー伝達デバイスであつて、電極表面と強く安定に接合することができ、かつ結線・断線が容易な自己組織化で構築されたデバイスを提供すること。

【解決手段】 次の一般式(1)により表されるメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体、及びこれを単量体として有する重合体。

【化1】



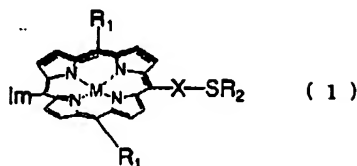
R<sub>1</sub>=アルキル基、無置換のアリール基、アルキル置換アリール基  
又はアルキルオキシ置換アリール基  
M=Zn, Ca, Ru, Fe, Co  
X=アリール基及びアルキレン基の少なくとも一方を含む二価の基  
R<sub>2</sub>=H 又はアセチル基



## 【特許請求の範囲】

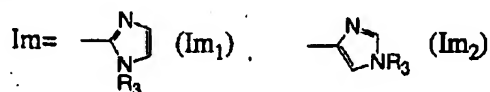
【請求項1】 次の一般式(1)：

【化1】



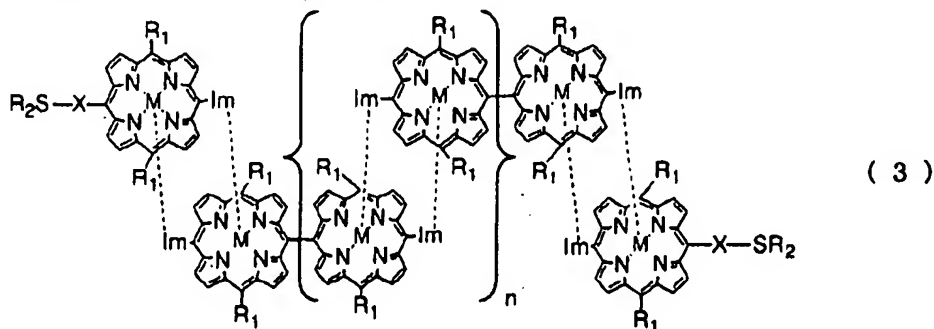
〔式中、 $R_1$ は、アルキル基、無置換のアリール基、アルキル置換アリール基及びアルキルオキシ置換アリール基からなる群から選択される基を表し、 $M$ は、 $Zn$ 、 $Ga$ 、 $Ru$ 、 $Fe$ 及び $Co$ からなる群から選択される金属を表し、 $X$ は、アリーレン基及びアルキレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基を表し、 $R_2$ は、水素原子又はアセチル基を表し、 $Im$ は、以下の $Im_1$ 又は $Im_2$ ：

【化2】



〔式中、 $R_3$ は、水素原子又はアルキル基を表す。〕により表されるイミダゾリル基を表す。〕で表されるメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体。

【請求項2】 一般式(1)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基、炭素数6～20のアリール基、炭素原子数7～24のアルキル置換アリール基及び炭素原子数7～24のアルコキシ置換アリール基からなる群から選択される基であり、 $X$ が $-(CH_2)_n-$  ( $n$ は、1～17の整数)及び炭素原子数6～14のアリーレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基である請求項1に記載のメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体。

【請求項3】 一般式(1)において、 $R_1$ が、炭素原

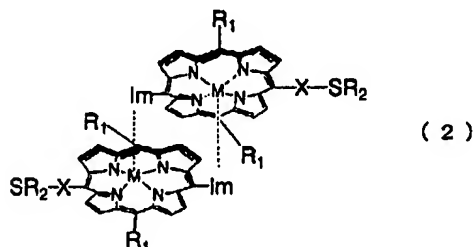
〔式中、 $R_1$ 、 $M$ 、 $R_2$ 、 $X$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)は、請求項1で規定したとおりであり、 $n$ は、0以上の整数を表す。〕で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)メルカプト置換。

【請求項8】 一般式(3)において、 $R_1$ が、炭素原

子数3～20のアルキル基であり、 $M$ が $Zn$ であり、 $X$ がフェニレン基であり、 $R_2$ がアセチル基であり、 $Im$ が $Im_1$  (式中、 $R_3$ は、メチル基)である請求項2に記載の一般式(1)で表されるポルフィリン金属錯体単量体。

【請求項4】 次の一般式(2)：

【化3】



〔式中、 $R_1$ 、 $M$ 、 $R_2$ 、 $X$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)は、請求項1で規定したとおり。〕で表されるメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体二量体。

【請求項5】 一般式(2)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基、炭素数6～20のアリール基、炭素原子数7～24のアルキル置換アリール基及び炭素原子数7～24のアルコキシ置換アリール基からなる群から選択される基であり、 $X$ が $-(CH_2)_n-$  ( $n$ は、1～17の整数)及び炭素原子数6～14のアリーレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基である請求項4に記載のメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体二量体。

【請求項6】 一般式(2)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基であり、 $M$ が $Zn$ であり、 $X$ がフェニレン基であり、 $R_2$ がアセチル基であり、 $Im$ が $Im_1$  (式中、 $R_3$ は、メチル基)である請求項5に記載のポルフィリン金属錯体二量体。

【請求項7】 次の一般式(3)：

【化4】

子数3～20のアルキル基、炭素数6～20のアリール基、炭素原子数7～24のアルキル置換アリール基及び炭素原子数7～24のアルコキシ置換アリール基からなる群から選択される基であり、 $X$ が $-(CH_2)_n-$  ( $n$ は、1～17の整数)及び炭素原子数6～14のアリーレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基である請求

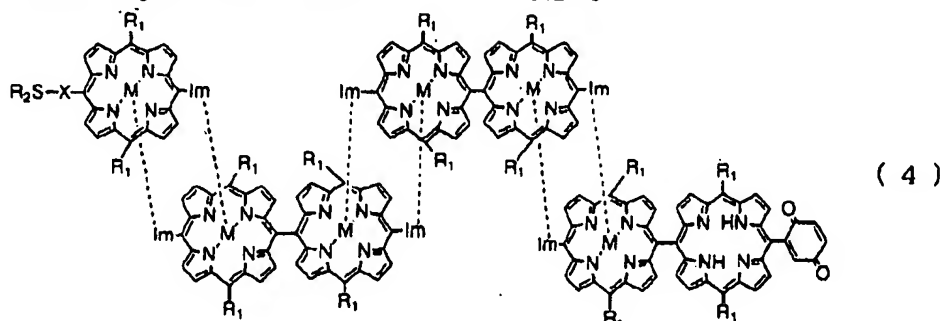
項7に記載の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)。

【請求項9】 一般式(3)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基であり、 $M$ が $Z_n$ であり、 $X$ がフェニレン基であり、 $R_2$ がアセチル基であり、 $Im$

が $Im_1$ (式中、 $R_3$ は、メチル基)である請求項8に記載の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)。

【請求項10】 次の一般式(4)：

【化5】



{式中、 $R_1$ 、 $M$ 、 $R_2$ 、 $X$ 、 $Im$ ( $R_3$ を含む)は、請求項1で規定したとおりであり、 $n$ は、0以上の整数を表す。}で表される両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)。

【請求項11】 一般式(4)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基、炭素数6～20のアリール基、炭素原子数7～24のアルキル置換アリール基及び炭素原子数7～24のアルコキシ置換アリール基からなる群から選択される基であり、 $X$ が $-(CH_2)_n-$ ( $n$ は、1～17の整数)及び炭素原子数6～14のアリーレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基である

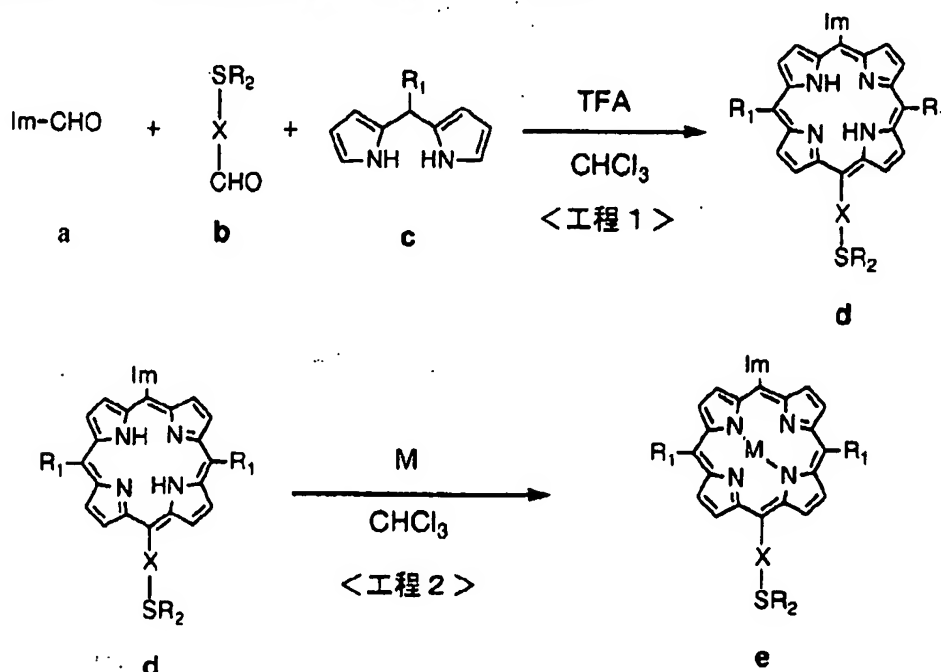
請求項10に記載の両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)。

【請求項12】  $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基であり、 $M$ が $Z_n$ であり、 $X$ がフェニレン基であり、 $R_2$ がアセチル基であり、 $Im$ が $Im_1$ (式中、 $R_3$ は、メチル基)である請求項10に記載の両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)。

【請求項13】 下記の工程1及び2：

1) 次の式(a)～(c)の化合物：

【化6】



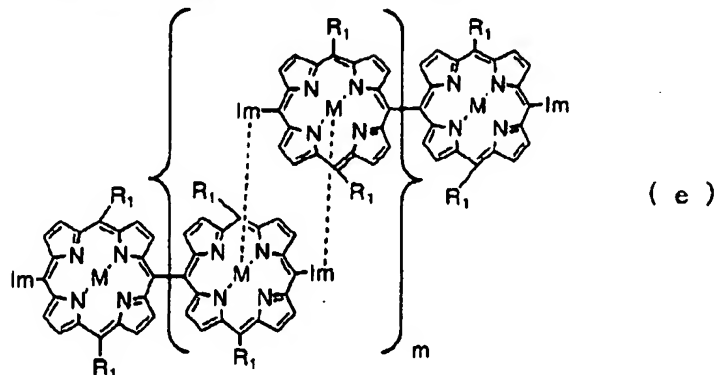
{式中、 $Im$ ( $R_3$ を含む)、 $X$ 、 $R_1$ 及び $R_2$ は請求項1で規定したとおり。}と、トリフルオロ酢酸を反応させ、式(d){式中、 $Im$ ( $R_3$ を含む)、 $X$ 、 $R_1$ 及び $R_2$ は請求項1で規定したとおり。}で表されるポルフィリンを得る工程；

2) 工程1で得られたポルフィリンに、金属 $M$ ( $M$ は、請求項1で規定したとおり。)を中心金属として挿入する工程を有し、前記工程1及び2が、配位性溶媒非存在下で行われることを特徴とする請求項4に記載される一般式(2)で表されるポルフィリン金属錯体二量体の製造

方法。

【請求項14】 請求項4に記載される一般式(2)で表されるポルフィリン金属錯体二量体を配位性溶媒に溶解することを特徴とする請求項1に記載される一般式

(1)で表されるポルフィリン金属錯体単量体の製造方



{式中、 $R_1$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む) 及び $M$ は、それぞれ、一般式(1)の $R_1$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む) および $M$ と同義であり、 $m$ は、0以上の整数を表す。}で表されるポリ(イミダゾリルポルフィリン)を配位性溶媒に溶解し、次いで、前記配位性溶媒の少なくとも一部を非配位性溶

法。

【請求項15】 請求項4に記載される一般式(2)で表されるポルフィリン金属錯体二量体と、次の式

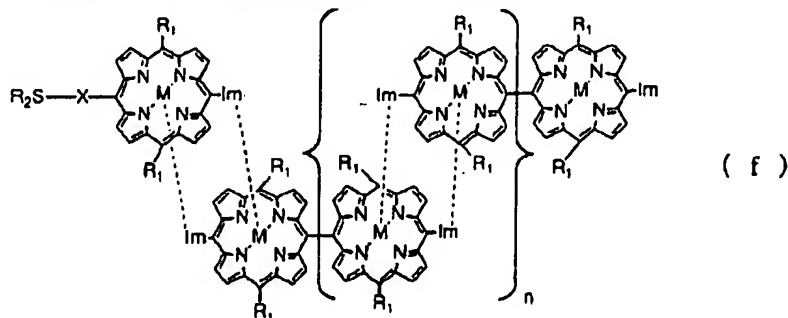
(e) :

【化7】

媒で置換することを特徴とする請求項7に記載される一般式(3)の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)の製造方法。

【請求項16】 次の式(f) :

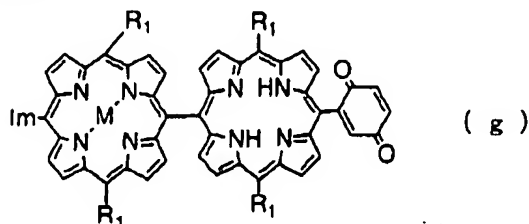
【化8】



式中、{式中、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $X$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)、 $M$ は、一般式(1)で規定した通りであり、 $n$ は0以上の整数を表す。}で表される片端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)と、次の式

(g) :

【化9】



{式中、 $R_1$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)、 $M$ は、一般式(1)で規定した通り。}で表されるイミダゾリルポルフィリン-キノニルポルフィリン二量体を配位性溶媒存在下に混合することを特徴とする前記一般式(4)のポルフィリンの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、新規なポルフィリン金属錯体及びそれらの製造方法に関する。より詳細には、本発明は、メルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体およびこれを構成単位として有する多量体であって、それが有するメルカプト基を介して電極と接合することができるものに関する。

【0002】本発明のポルフィリン金属錯体単量体を構成単位として有する多量体は、ナノメートルないしサブマイクロメートル単位の極めて微小な光エネルギー及び電子エネルギー伝達デバイスとなり得る。具体的には、本発明のポルフィリン金属錯体を構成単位として有する多量体は、人工光合成システムおよび太陽電池等の材料として利用することができる。

【0003】

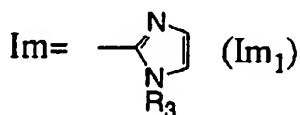
【従来の技術】ポルフィリン金属錯体は、4個のピロール核が4個のメチン基により架橋された環状テトラピロールの中心に金属が挿入された錯体である。ポルフィリン環二重結合が一つ還元された構造をクロリンと呼び、

クロロフィルはクロリン骨格に中心金属としてマグネシウム(II)が挿入されたものである。クロロフィルは光合成蛋白質系で光エネルギーを捕集・伝達するアンテナ錯体、電子の伝達を行なっているスペシャルペア、フェオフィチン(金属は挿入されてない)として機能し、最後にベンゾキノニルへ電子が伝達され貯蔵される。

【0004】分子レベルでの電線は光電デバイスあるいは電子伝達、エネルギー伝達を行なう光合成機能としての重要性から様々な研究がなされている。ポルフィリン金属錯体はその共役 $\pi$ 電子特性から分子電線の材料として適しており、金等の電極に接合されたポルフィリンの報告がいくつかされている。

【0005】例えば、坂田等はチオール基を介してポルフィリンを金表面に自己集合させている{Chem. Lett. 1447 (1994), Chem. Lett. 907 (1996), Chem. Commun. 57 (1998), Chem. Lett. 267 (1998)}。しかし、電気化学測定、金電極表面における発光実験等は詳細に検討されているが電線への展開がなされていない。Lindseyらは最近、チオール誘導体を置換基とするポルフィリン単量体を合成した(J. Org. Chem., 64, 8635(1999))。チオール誘導体によって、例えばアセチル誘導体は金表面に接合するがピバロイル基は接合しないといった興味深い知見は得られているが、共有結合によるポルフィリンの多量化は今後の課題となっている。共有結合を用いてのポルフィリンの多量化による電線の構築には合成および精製に時間と労力を要する、連鎖の結線・断線が容易でないという問題があり、成功例は報告されていない。また、高橋等およびその他は太陽電池の材料として研究しているが(J. Phys. Chem. B, 103, 4868(1999), J. Phys. Chem. B, 101, 991(1997), J. Phys. Chem., 91, 3055(1987))、単純なポルフィリン化合物やそれらの混合物を用いて最高18.9%の光電流効率を得ているが、電極への接合法、ポルフィリン化合物の選択に改良の余地があると思われる。

【0006】



【0011】(式中、 $\text{R}_3$ は、水素原子又はアルキル基を表す。)により表されるイミダゾリル基を表す。)で表されるメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体。

【0012】(2) 一般式(1)において、 $\text{R}_1$ が、炭素原子数3~20のアルキル基、炭素数6~20のアリール基、炭素原子数7~24のアルキル置換アリール基及び炭素原子数7~24のアルコキシ置換アリール基からなる群から選択される基であり、Xが $-(\text{CH}_2)_n-$ ( $n$ は、1~17の整数)及び炭素原子数6~14のアリーレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基であ

【発明が解決しようとする課題】本発明は、人工光合成および新規な太陽電池材料へ応用展開することのできるナノメートル単位の極めて微小な光エネルギー、電子エネルギー伝達デバイスであって、電極表面と強く安定に接合することができ、かつ結線・断線が容易な自己組織化で構築されたデバイスを提供することを目的とする。

【0007】また、本発明は、上記デバイスの製造方法を提供することも目的とする。

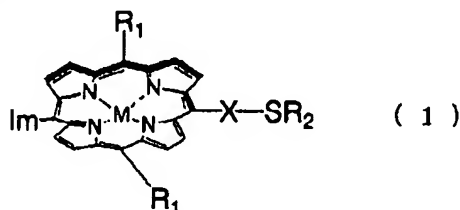
【0008】

【課題を解決するための手段】本発明者らは、上記課題を解決するために鋭意研究した結果、ポルフィリン金属錯体に特定のイミダゾリル基および特定のメルカプト基を結合させたイミダゾリルポルフィリンを見出し、これを構成単位として有する多量体により上記目的が解決できることを確認し、本発明を完成した。

【0009】すなわち、本発明は、次の化合物およびそれらの製造方法を提供する：

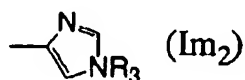
(1) 次の一般式(1)：

【化10】



【0010】(式中、 $\text{R}_1$ は、アルキル基、無置換のアリール基、アルキル置換アリール基及びアルキルオキシ置換アリール基からなる群から選択される基を表し、Mは、Zn、Ga、Ru、Fe及びCoからなる群から選択される金属を表し、Xは、アリーレン基及びアルキレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基を表し、 $\text{R}_2$ は、水素原子又はアセチル基を表し、Imは、以下の $\text{Im}_1$ 又は $\text{Im}_2$ ：

【化11】

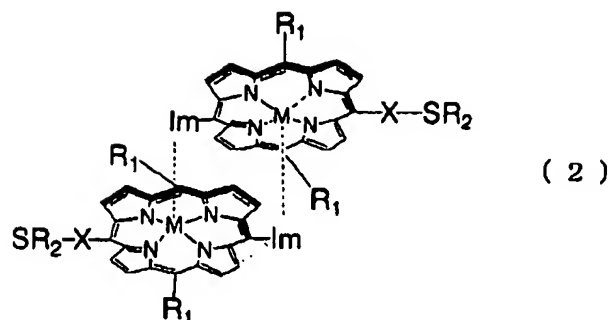


る上記(1)に記載のメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体。

【0013】(3) 一般式(1)において、 $\text{R}_1$ が、炭素原子数3~20のアルキル基であり、MがZnであり、Xがフェニレン基であり、 $\text{R}_2$ がアセチル基であり、Imが $\text{Im}_1$ (式中、 $\text{R}_3$ は、メチル基)である上記(2)に記載の一般式(1)で表されるポルフィリン金属錯体単量体。

【0014】(4) 次の一般式(2)：

【化12】



【0015】{式中、 $R_1$ 、 $M$ 、 $R_2$ 、 $X$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)は、請求項1で規定したとおり。}で表されるメルカプト置換イミダゾリルボルフィリン金属錯体二量体。

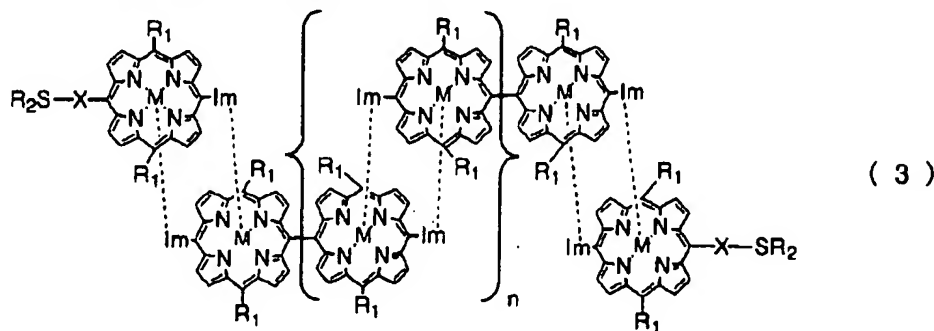
【0016】(5) 一般式(2)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基、炭素数6～20のアリール基、炭素原子数7～24のアルキル置換アリール基及び炭素原子数7～24のアルコキシ置換アリール基からなる群から選択される基であり、 $X$ が $-(CH_2)_n-$  ( $n$ は、1～17の整数)及び炭素原子数6～14の

アリーレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基である上記(4)に記載のメルカプト置換イミダゾリルボルフィリン金属錯体二量体。

【0017】(6) 一般式(2)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基であり、 $M$ が $Zn$ であり、 $X$ がフェニレン基であり、 $R_2$ がアセチル基であり、 $Im$ が $Im_1$  (式中、 $R_3$ は、メチル基)である上記(5)に記載のボルフィリン金属錯体二量体。

【0018】(7) 次の一般式(3)：

【化13】



【0019】{式中、 $R_1$ 、 $M$ 、 $R_2$ 、 $X$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)は、請求項1で規定したとおりであり、 $n$ は、0以上の整数を表す。}で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)メルカプト置換。

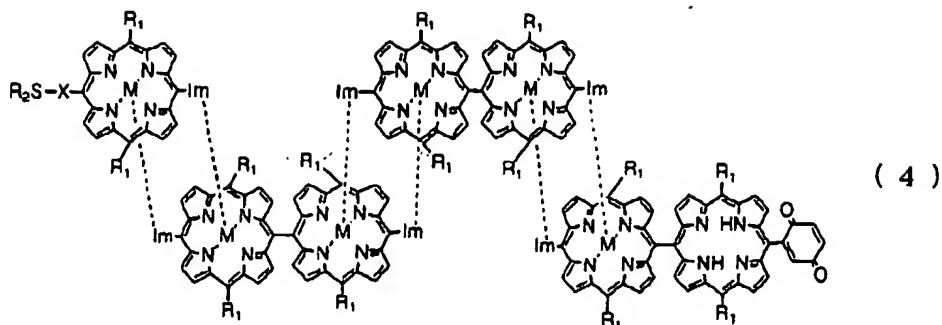
【0020】(8) 一般式(3)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基、炭素数6～20のアリール基、炭素原子数7～24のアルキル置換アリール基及び炭素原子数7～24のアルコキシ置換アリール基からなる群から選択される基であり、 $X$ が $-(CH_2)_n-$  ( $n$ は、1～17の整数)及び炭素原子数6～14の

アリーレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基である上記(7)に記載の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)。

【0021】(9) 一般式(3)において、 $R_1$ が、炭素原子数3～20のアルキル基であり、 $M$ が $Zn$ であり、 $X$ がフェニレン基であり、 $R_2$ がアセチル基であり、 $Im$ が $Im_1$  (式中、 $R_3$ は、メチル基)である上記(8)に記載の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)。

【0022】(10) 次の一般式(4)：

【化14】



【0023】(式中、 $R_1$ 、 $M$ 、 $R_2$ 、 $X$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)は、請求項1で規定したとおりであり、 $n$ は、0以上の整数を表す。)で表される両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)。

【0024】(11) 一般式(4)において、 $R_1$ が、炭素原子数3~20のアルキル基、炭素数6~20のアリール基、炭素原子数7~24のアルキル置換アリール基及び炭素原子数7~24のアルコキシ置換アリール基からなる群から選択される基であり、 $X$ が $-(CH_2)_n-$  ( $n$ は、1~17の整数)及び炭素原子数6~14のアリーレン基の少なくとも一方を含む二価の連結

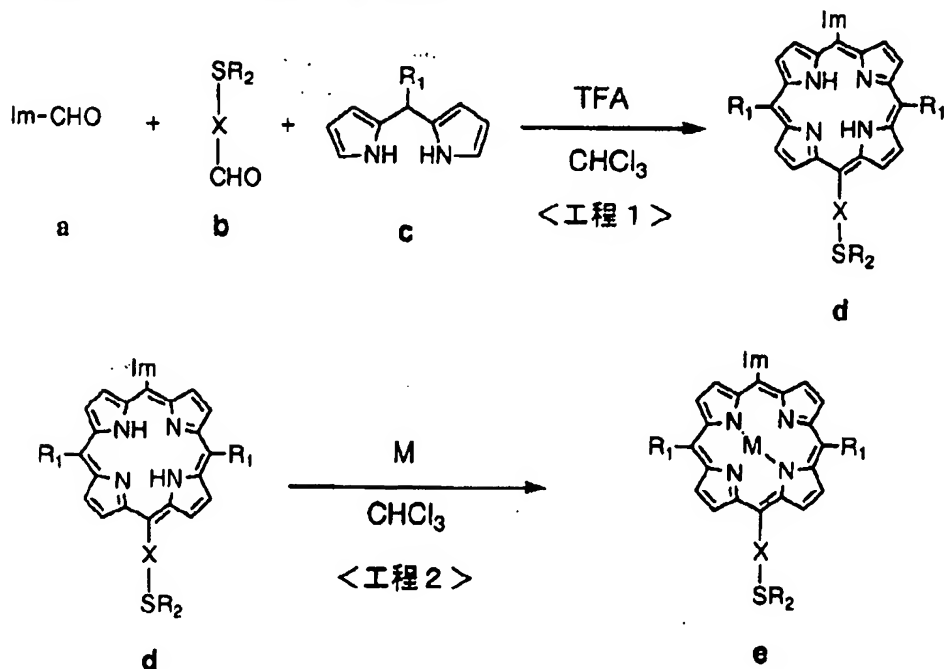
基である上記(10)に記載の両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)。

【0025】(12)  $R_1$ が、炭素原子数3~20のアルキル基であり、 $M$ が $Zn$ であり、 $X$ がフェニレン基であり、 $R_2$ がアセチル基であり、 $Im$ が $Im_1$  (式中、 $R_3$ は、メチル基)である上記(10)に記載の両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)。

【0026】(13) 下記の工程1及び2：

1) 次の式(a)~(c)の化合物：

【化15】



【0027】(式中、 $Im$  ( $R_3$ を含む)、 $X$ 、 $R_1$ 及び $R_2$ は請求項1で規定したとおり。)と、トリフルオロ酢酸を反応させ、式(d) (式中、 $Im$  ( $R_3$ を含む)、 $X$ 、 $R_1$ 及び $R_2$ は請求項1で規定したとおり。)で表されるポルフィリンを得る工程；

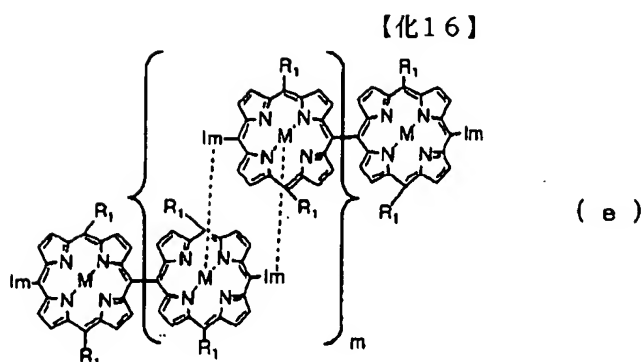
2) 工程1で得られたポルフィリンに、金属 $M$  ( $M$ は、請求項1で規定したとおり。)を中心金属として挿入する工程を有し、前記工程1及び2が、配位性溶媒非存在下で行われることを特徴とする上記(4)に記載される

一般式(2)で表されるポルフィリン金属錯体二量体の製造方法。

【0028】(14) 上記(4)に記載される一般式(2)で表されるポルフィリン金属錯体二量体を配位性溶媒に溶解することを特徴とする上記(1)に記載される一般式(1)で表されるポルフィリン金属錯体単量体の製造方法。

【0029】(15) 上記(4)に記載される一般式(2)で表されるポルフィリン金属錯体二量体と、次の

式(e):

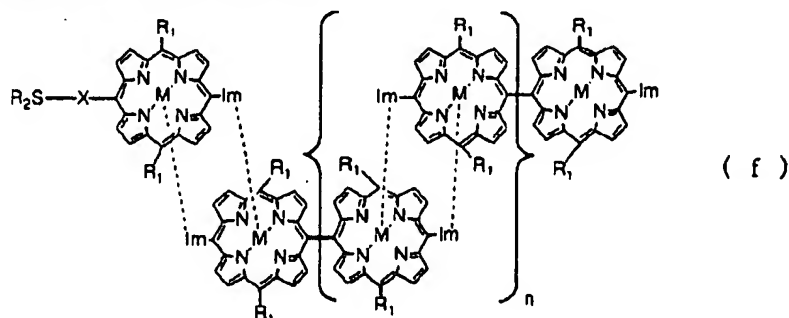


【0030】{式中、 $R_1$ 、Im ( $R_3$ を含む) 及びMは、それぞれ、一般式(1)の $R_1$ 、Im ( $R_3$ を含む)およびMと同義であり、mは、0以上の整数を表す。}で表されるポリ(イミダゾリルポルフィリン)を配位性溶媒に溶解し、次いで、前記配位性溶媒の少なくとも一部を非配位性溶媒で置換することを特徴とする上記

(7)に記載される一般式(3)の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)の製造方法。

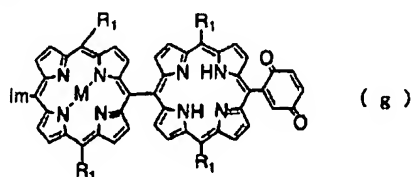
【0031】(16) 次の式(f):

【化17】



【0032】式中、{式中、 $R_1$ 、 $R_2$ 、X、Im ( $R_3$ を含む)、Mは、一般式(1)で規定した通りであり、nは0以上の整数を表す。}で表される片端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)と、次の式(g):

【化18】



【0033】{式中、 $R_1$ 、Im ( $R_3$ を含む)、Mは、一般式(1)で規定した通り。}で表されるイミダゾリルポルフィリン-キノニルポルフィリン二量体を配位性溶媒存在下に混合することを特徴とする前記一般式(4)のポルフィリンの製造方法。

【0034】

【発明の実施の形態】以下、本発明の一般式(1)で表されるメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体及びこれを構成単位として有する、一般式(2)~(4)で表される多量体を詳細に説明する。

【0035】上記一般式(1)において、Mは、Zn(II)

I)、Ga(III)、Fe(II)、Co(II)及びRu(II)からなる群から選択される金属を表すが、ポルフィリンの中心金属となり得る金属であればこれら以外の金属であってもよい。Mは、製造の容易性の観点からZn(II)が好ましい。

【0036】一般式(1)において、 $R_1$ は、アルキル基、無置換のアリール基、アルキル置換アリール基およびアルキルオキシ置換アリール基からなる群から選択される基を表す。一般式(1)が有する2つの $R_1$ は、同じであっても互いに異なってもよいが、同じであることが製造上の容易性の観点から好ましい。

【0037】 $R_1$ により表されるアルキル基には、直鎖、分岐鎖、環状のアルキル基が含まれる。アルキル基の炭素数は、好ましくは、3~20、より好ましくは、7~18である。 $R_1$ により表されるアルキル基は、一般式(1)のポルフィリンを構成単位として多量体を重合する際に障害がなく、また、この多量体が光エネルギー、電子エネルギー伝達機能を有する限り置換基を有していてもよい。

【0038】 $R_1$ により表されるアルキル基の具体例には、n-ヘプチル、n-ノニル、n-ウンデシル、n-トリデシルが含まれる。

【0039】 $R_1$ により表されるアリール基としては、



好ましくは、炭素数6～20、より好ましくは、6～12のものが含まれ、具体的には、フェニル、ナフチル、ビフェニルを挙げることができる。

【0040】 $R_1$ により表されるアルキル置換アリール基において、アリール部分としては、好ましくは、炭素数6～14、より好ましくは、6～12のアリール基が含まれ、具体的には、フェニル、ナフチル、ビフェニルを挙げることができる。

【0041】上記アリール基に置換するアルキル基には、直鎖、分岐鎖、環状のアルキル基が含まれる。このアルキル基の炭素数は、好ましくは、1～18、より好ましくは、1～12である。置換するアルキル基の数及びそれらの置換位置は、アリール基に置換し得る位置及び数であり、一般式(1)のポルフィリンを構成単位として多量体を重合する際に障害がなく、また、この多量体が光エネルギー、電子エネルギー伝達機能を有する限り特に制限はないが、製造の容易性、溶解度等を考慮すると、1～3個のアルキル基が $o$ -、 $m$ -、 $p$ -位に置換することができる。これらのうち、 $o$ -位にアルキル基が置換したものは、所望しない副反応を抑える点で好ましい。

【0042】 $R_1$ により表されるアルキル置換アリール基の具体例としては、4-メチルフェニル、4-オクチルフェニル、2, 4, 6-トリメチルフェニルを挙げることができる。

【0043】 $R_1$ により表されるアルキルオキシ置換アリール基において、アリール部分としては、上記アルキル置換アリール基で規定したアリール基と同義である。

【0044】上記アリール基に置換するアルキルオキシ基には、直鎖、分岐鎖、環状のアルキルオキシ基が含まれる。このアルキルオキシ基の炭素数は、好ましくは、1～20、より好ましくは、1～18である。置換するアルキルオキシ置換基の数及びそれらの置換位置は、アリール基に置換し得る数及び位置であり、一般式(1)のポルフィリンを構成単位として多量体を重合する際に障害がなく、また、この多量体が光エネルギー、電子エネルギー伝達機能を有する限り特に制限はないが、製造の容易性、溶解度等を考慮すると、1～3個のアルキルオキシ基が $o$ -、 $m$ -、 $p$ -位に置換することができる。これらのうち、 $o$ -位にアルキルオキシ基が置換したものは、所望しない副反応を抑える点で好ましい。

【0045】 $R_1$ により表されるアルキルオキシ置換アリール基の具体例としては、4-メトキシフェニル、4-オクチルオキシフェニル、4-ドデシルオキシフェニルを挙げることができる。

【0046】一般式(1)において、Xは、アリーレン基及びアルキレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基を表す。

【0047】Xにより表されるアリーレン基及びアルキレン基の少なくとも一方を含む二価の連結基とは、具体

的には、-(アルキレン)-、-(アリーレン)-、-(アルキレン)-(アリーレン)-、及び-(アリーレン)-(アルキレン)-からなる群から選択される基をいう。

【0048】Xにより表されるアルキレン基には、 $-(CH_2)_n-$  ( $n$ は、1～17の整数、好ましくは1～13の整数を表す。)が含まれる。

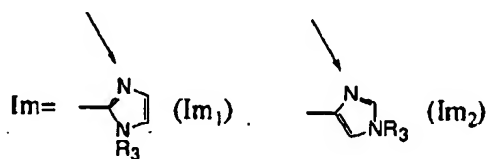
【0049】Xにより表されるアリーレン基は、好ましくは、 $R_1$ で表されるアリール基から水素原子を1つ取り去った二価の基を表し、より好ましくは、フェニレン基を表す。

【0050】Xは、製造の容易性の観点から、フェニレン基が好ましい。

【0051】一般式(1)において、 $R_2$ は、水素原子又はアセチル基を表す。

【0052】一般式(1)において、 $I_m$ で表されるイミダゾリル基には、以下の $I_{m1}$ 及び $I_{m2}$ ：

【化19】



【0053】が含まれる。

【0054】上記 $I_{m1}$ 及び $I_{m2}$ において、 $R_3$ は、水素原子またはアルキル基を表す。

【0055】 $R_3$ により表されるアルキル基の炭素数としては、一般式(1)のポルフィリンを構成単位として多量体を重合する際に障害がなく、また、この多量体が光エネルギー、電子エネルギー伝達機能を有する限り特に制限はないが、好ましくは、1～4である。 $R_3$ は、製造の容易性の観点からメチル基がより好ましい。

【0056】本発明の一般式(2)で表されるメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体二量体(以下、「相補的配位型二量体」ともいう。)において、 $R_1$ 、M、X、 $R_2$ 、 $I_m$ 及び $R_3$ は、上記一般式(1)における $R_1$ 、M、X、 $R_2$ 、 $I_m$ 及び $R_3$ とそれぞれ同義である。

【0057】一般式(2)の相補的配位型二量体に結合するイミダゾール環とベンゼン環は、ピロール環とメチン基とにより構成される平面に対してほぼ垂直な平面上に広がるようにそれぞれ配置されている。

【0058】また、一般式(2)の相補的配位型二量体において、中心金属Mとピロール核の窒素原子との結合は、配位結合である。中心金属Mと $I_m$ (イミダゾリル基)の窒素原子との結合も、配位結合であり、上記 $I_{m1}$ 及び $I_{m2}$ の矢印で示す配位サイトで配位している。

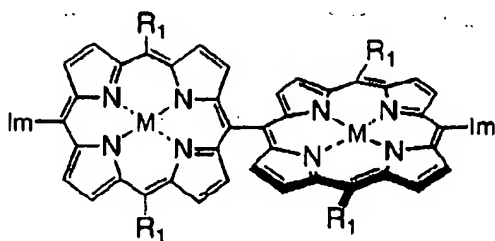
【0059】この中心金属Mと $I_m$ との配位結合は非常に強い。例えば、Bull. Chem. Soc. Jpn., 69, 3563 (1996)には、本発明の一般式(2)の二量体を構成するポ

ルフィリン錯体と類似の構造を有するポルフィリン錯体とイミダゾリル基の窒素原子との配位結合は、 $10^{-9}$  M 濃度でも維持されることが記載されている。

【0060】一般式(2)の相補的配位型二量体を構成する2つのポルフィリン単量体は、互いに同じであっても異なってもよいが、同じであることが製造上の容易性の観点から好ましい。

【0061】本発明の一般式(3)で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)において、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $M$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)は、上記一般式(1)における $R_1$ 、 $R_2$ 、 $M$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)とそれぞれ同義であり、 $n$ は、0以上の整数を表す。

【0062】一般式(3)の $n$ の値は、両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)の用途に応じて適宜設定することができ、その範囲に特に制限はない。例えば、ナノメートル単位の鎖長を有する光エネルギー伝達デバイスとして用いる場合には、繰り返し単位の長さ1.4 nmから計算して、 $n$ の



【0065】本発明の一般式(3)で表されるポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)において、上記メソ型二量体の立体構造はそのまま維持され、これらのメソ型二量体が上下互い違いになるように鎖状に配置されている。

【0066】メソ型二量体を構成する2つの単量体の各置換基{ $M$ 、 $R_1$ 、 $Im$  ( $R_3$ を含む)}は、互いに同じでも異なってもよいが、製造の容易性、精製の容易性等を考慮すると同じであることが好ましい。また、本発明の一般式(3)で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)を構成する複数のメソ型二量体は、互いに同じであっても異なってもよいが、製造の容易性等を考慮すると同じであることが好ましい。さらに、両端の $R_2S-X$ -基も互いに同じであっても異なってもよいが、製造の容易性等を考慮すると同じであることが好ましい。

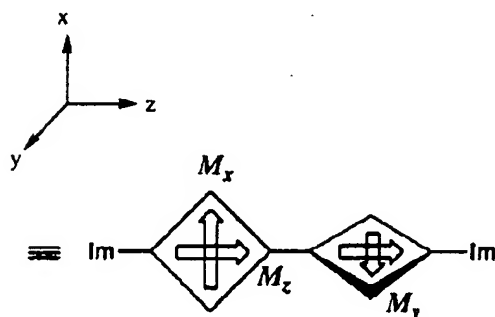
【0067】本発明の一般式(3)で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン)金属錯体は、これを溶解する溶媒の配位性を選択することにより、中心金属 $M$ とイミダゾリル基( $Im$ )との間

最大値を714程度にまですることができる。また、ナノメートル単位を越えたより長い鎖長を所望する場合には、 $n$ の値をさらに増加させることができ、例えば、800~1000程度の値に設定することもできる。本発明者らは、現段階では、最大で $n$ が400程度の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)の合成に成功している。

【0063】本発明の一般式(3)で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)のポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)部分は、以下に示すように、イミダゾリル基1つが置換したポルフィリン単量体2つが、各々の単量体の4つのピロール核により形成される $p$ -軌道平面が互いに直交するように直接結合した二量体(以下、この二量体を「メソ型二量体」ともいう。)を構成単位として有している。

【0064】

【化20】



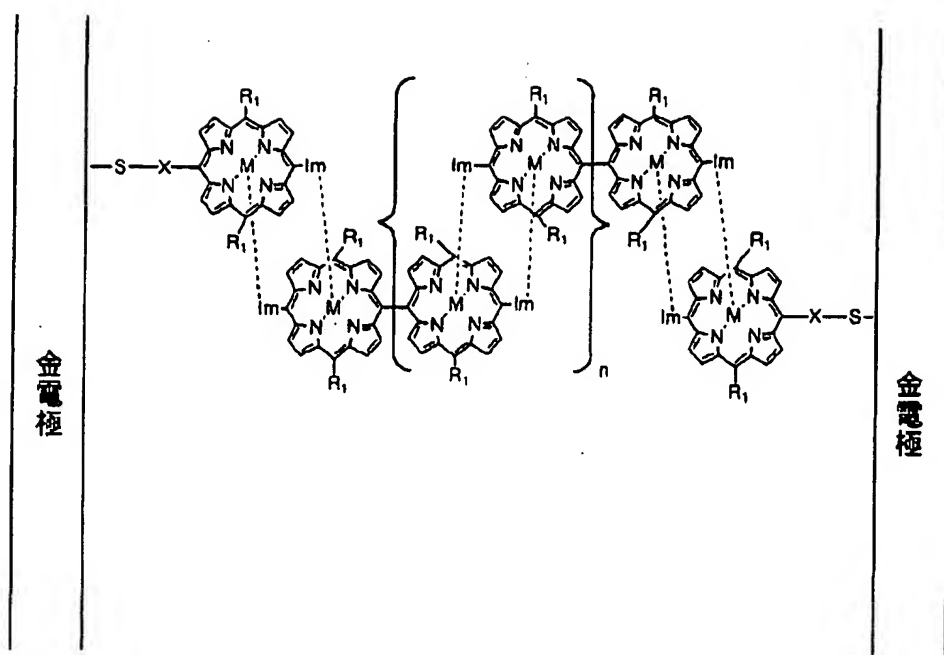
の配位結合の結合と切断を制御することができる。具体的には、メタノール、エタノール、ピリジン等の配位性溶媒存在下には、中心金属 $M$ とイミダゾリル基( $Im$ )との間の配位結合が切断される。一方、配位性溶媒非存在下には、中心金属 $M$ とイミダゾリル基( $Im$ )との間の配位結合が結合される。配位性溶媒非存在下の溶媒としては、クロロホルム、ベンゼン、トルエン等を用いることができる。

【0068】アセチルチオフェニル基を有する化合物が、その溶液中に金電極を浸すだけでアセチル基が解裂し強い $Au-S$ 結合を生成し、金電極表面に自己組織化した単分子層を形成することが知られている。

【0069】従って、本発明の一般式(3)で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)において、その末端基がアセチル $S-X$ であるものは、これをクロロホルム等の非配位性溶媒に溶解した溶液中に、金電極を浸すことにより、以下に示すように電極間を連結する電線として利用することができる。

【0070】

## 【化21】



【0071】本発明の一般式(4)で表される両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)は、上述した一般式(3)で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)の一端の $R_2S-X$ -基がp-ベンゾキノニル基に置換し、このキノニル基に結合するポルフィリン環の中心金属Mが欠落していること以外は、一般式(3)と同じである。

【0072】本発明の一般式(4)で表される両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)は、そのメソ型二量体単位において、互いに最も近い中心金属の距離(以下、「二量体内距離」ともいう。)は、0.84 nmであり、互いに最も近い、1つのメソ型二量体の中心金属と他のメソ型二量体の中心金属との距離(以下、「二量体間距離」ともいう。)は、0.59 nmである(Cerius (Angew. Chem, Int. Ed. Engl. 33, 655-657(1994))により推定)。

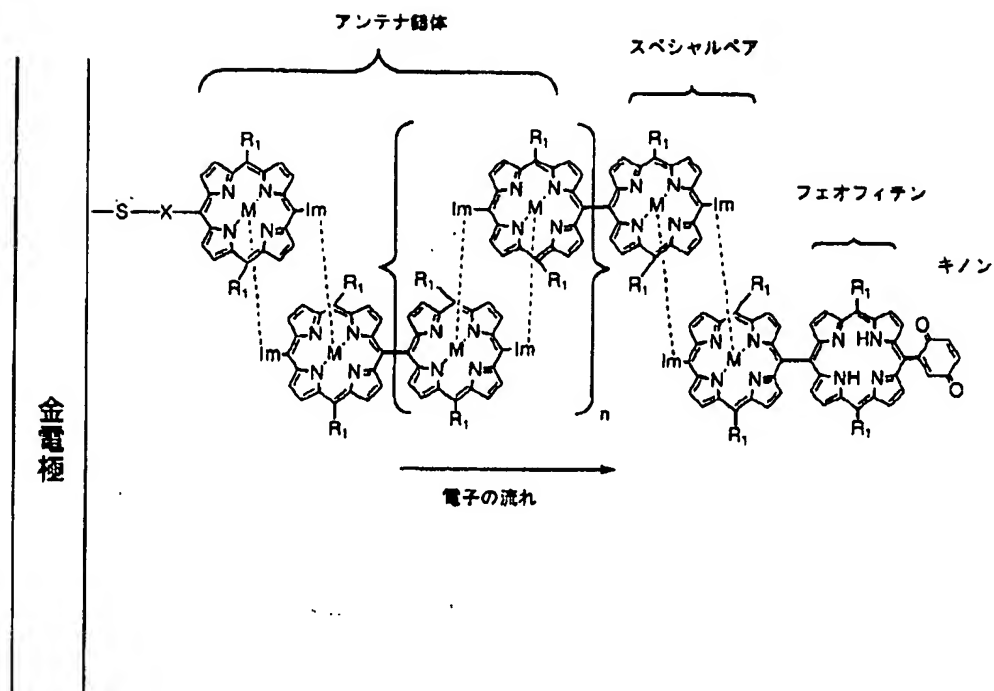
【0073】このように、本発明の一般式(4)で表される両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)のメソ型二量体間距

離及びメソ型二量体内距離は、天然のアンテナリングのクロロフィル間距離に匹敵する短い距離にあるものである。例えば、Rhodospseudomonas acidophila由来のB850の二量体内距離は、0.95 nmであり、二量体間距離は、0.89 nmであるといわれている。このような短い距離にクロロフィルが配置されることにより、発色団の強い励起相互作用を誘発し、その結果得られる色素の励起子非局在化が、超高速励起ダイナミクスの源であるといわれている。このことから、本発明の両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)が電子伝達系を形成し得ることが強く推測される。

【0074】具体的には、以下の式に示すように、本発明の一般式(4)の化合物において、一端の $SX$ -基を金電極に結合させることにより、アンテナ錯体⇒スペシャルペア⇒フェオフィチン⇒キノンへのエネルギー・電子移動の機能を再現し、人工光合成系を構築することが期待される。

【0075】

【化22】

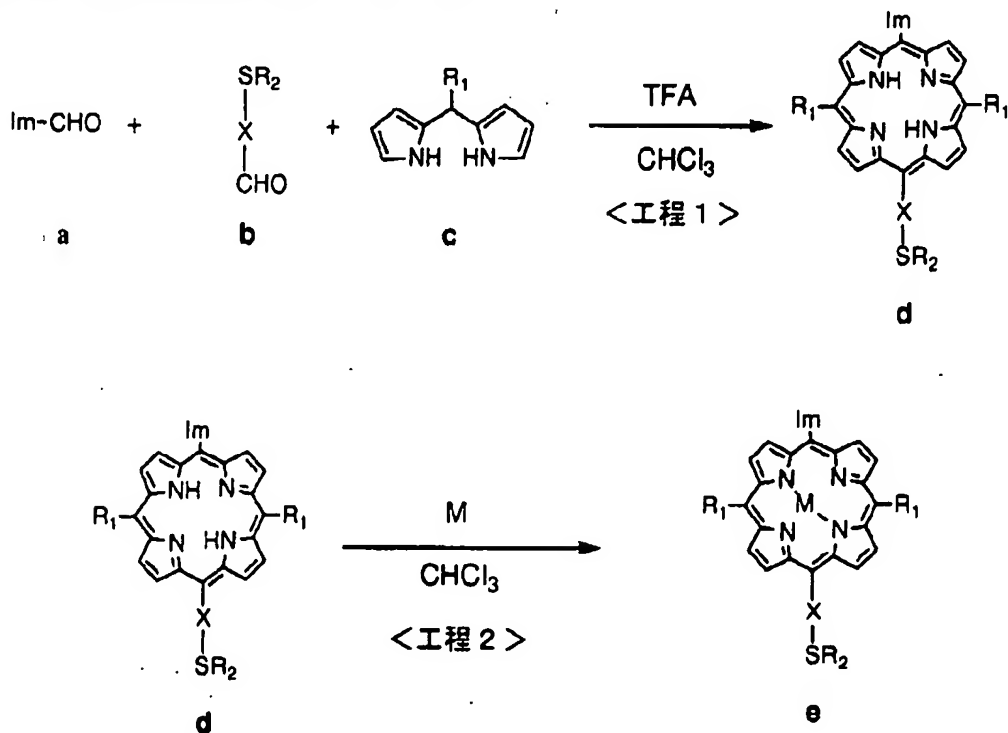


【0076】以下に、本発明の一般式(2)で表されるメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体二量体(相補的配位型二量体)において、Mが亜鉛であり、R<sub>2</sub>がアセチル基であるものの合成方法を説明するが、本発明の一般式(2)で表される相補的配位型二量体の合成方法はこれに限定されるものではない。また、他の

置換基のものについても用いる化合物、触媒、反応温度等の反応条件を適宜反抗することにより製造することができる。

【0077】

【化23】



【0078】<工程1>化合物dの合成

化合物a、化合物b及び化合物c(式中、R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、Im(R<sub>3</sub>を含む)及びXは、一般式(1)で規定したとお

り)を、CHCl<sub>3</sub>あるいはアセトニトリルのような溶媒に溶解し、窒素雰囲気下に置換したあとこれにTFA(トリフルオロ酢酸)を添加し、反応させ、ポルフィリン

(d)を合成する。化合物a～cは、市販品であるか又は市販品から文献等に記載の方法により合成することができる。

【0079】化合物a、化合物b及び化合物cの添加量は、通常、1:1:2に設定することができる。

【0080】溶媒は、通常、化合物b重量に対し500～1000倍量用いることができる。

【0081】反応温度は、通常、20～30℃に設定することができる。反応時間は、通常、1～3時間に設定することができる。

【0082】反応後、必要に応じて精製等の工程を経て、得られた物質を次の<工程2>に供する。精製工程は、例えば、上記反応に用いた溶媒を留去した後、クロロホルム、ジクロロメタンのような溶媒に溶解し、溶液に重炭酸ナトリウム水溶液を加え分液後、有機層を乾燥濃縮した後、シリカゲルカラムクロマトグラフィー等により行うことができる。

【0083】<工程2>化合物eの合成

上記工程1で得られた化合物dを亜鉛錯体eに変換する。この反応は、化合物dをクロロホルム、ジクロロメタンのような溶媒に溶解し、亜鉛の塩（例えば、酢酸亜鉛(II)、塩化亜鉛(II)）添加することにより行うことができる。

【0084】添加する亜鉛の塩の量は、通常、化合物重量の5～20倍量に設定することができる。

【0085】反応温度は、通常、室温(約25～30℃)に設定することができ、反応時間は、1～3時間に設定することができる。

【0086】反応後、蒸留水により、反応溶液を洗浄し、有機層を減圧濃縮することにより一般式(2)の二量体( $R_2$ =アセチル基)が得られる。

【0087】一般式(2)において、 $R_2$ が水素原子であるものは、上記の方法により得られた化合物eを加水分解することにより合成することができる。加水分解の条件の一例をあげると、クロロホルム、ジクロロメタンのような溶媒に溶解し、1N塩酸を加えることにより行うことができる。反応温度は通常、室温(25～30℃)で、反応時間は、10～20分に設定することができる。添加する酸の量は、化合物重量に対し、20～50倍量用いることができる。

【0088】本発明の一般式(1)で表されるメルカプト置換イミダゾリルポルフィリン金属錯体単量体は、一般式(2)で表される相補的配位型二量体を配位性溶媒に溶解することにより、中心金属とイミダゾリル基の窒素原子との間の配位結合が切れ、生成する。配位性溶媒としては、メタノール、エタノール等を用いることができる。

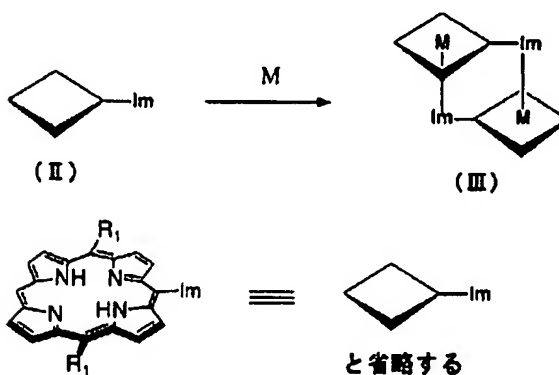
【0089】本発明の一般式(3)で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)は、一般式(2)で表されるメルカプト置換イ

ミダゾリルポルフィリン金属錯体二量体と、上記式(e)で表されるポリ(イミダゾリルポルフィリン)を配位性溶媒に溶解し、次いで、前記配位性溶媒の少なくとも一部を非配位性溶媒で置換することにより製造することができる。

【0090】この製造工程で用いる式(e)のポリ(イミダゾリルポルフィリン)は、次の工程(a)～(c)を経て合成することができる。

【0091】(工程a)下記式(II)で表されるポルフィリン単量体に、金属Mをポルフィリンの中心金属として挿入し、式(III)で表される相補配位型二量体を得る工程と、

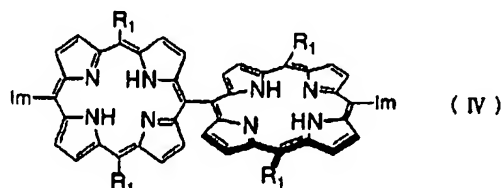
【化24】



【0092】(式中、M、 $R_1$ 、Imは、本発明の一般式(1)で規定した通りである。);

(工程b)前記工程(a)で得られた式(III)の相補配位型二量体から中心金属を除き、下記式(IV)で表されるメソ型二量体を得る工程と、

【化25】



【0093】(式中、 $R_1$ 、Imは、本発明の一般式(1)で規定した通りである。);

(工程c)前記工程(b)で得られた一般式(IV)のメソ型二量体に中心金属Mを挿入し、この中心金属とImを配位させることにより式(e)で表されるポリ(ポルフィリン)を得る工程。

【0094】以下、式(e)で表されるポリ(ポルフィリン)の製造方法を、 $R_1 = n-C_7H_{15}$ 、 $M = Zn$ であり、 $Im = Im_1$ ( $R_2$ =メチル基)であるものを例に挙げて説明するが、他の置換基のものについても用いる化合物、触媒、反応温度等の反応条件を適宜変更することにより製造することができる。また、本発明の式(e)のポリ(ポルフィリン)の製造方法は、これに限定されるものではない。

【0095】上記工程aの出発原料である式(II)で表されるボルフィリン単量体は、1-メチルイミダゾール-2-カルボキシアルデヒド、ホルムアルデヒド及びmeso-(n-ヘプチル)ジピロメタンを非極性溶媒中に溶解し、攪拌後、トリフルオロ酢酸を添加し、ジクロロジシアノ-p-ベンゾキノンを添加することにより得られる。

【0096】上記反応において用いる1-メチルイミダゾール-2-カルボキシアルデヒド及びホルムアルデヒドは市販品を用いることができる。meso-(n-ヘプチル)ジピロメタンは、文献等に記載の方法に従い、オクタナール及びピロールから製造することができる。

【0097】1-メチルイミダゾール-2-カルボキシアルデヒド：ホルムアルデヒド：meso-(n-ヘプチル)ジピロメタンの使用モル比は、通常、1：4：2～1：3：2に設定することができる。

【0098】非極性溶媒としては、クロロホルム、THF等を用いることができ、通常、化合物重量に対し500～1000倍の量用いる。

【0099】反応溶液に添加するトリフルオロ酢酸の量は、1-メチルイミダゾール-2-カルボキシアルデヒドに対して通常、1～3倍モル使用することができる。これらの化合物の反応は、窒素のような不活性気体雰囲気下で、通常、室温付近の温度において、20～40分間攪拌することにより行う。

【0100】攪拌後の反応溶液に添加するジクロロジシアノ-p-ベンゾキノンの量は、1-メチルイミダゾール-2-カルボキシアルデヒドに対して通常、2～4倍モル使用することができる。この反応は、通常、30分～1時間攪拌することにより行う。

【0101】得られた反応溶液を重炭酸ナトリウム等の水性溶媒で洗浄した後、有機層を蒸発させることにより式(II)の粗生成物が得られる。この粗生成物は、必要に応じてカラムクロマトグラフィー等を用いて精製し、工程aの出発物質として用いることができる。

【0102】工程aにおいて、式(II)のボルフィリン単量体を非極性溶媒に溶解し、亜鉛の塩を有機溶媒に溶解した溶液を添加することにより、式(III)の相補配位型二量体<sub>2</sub>が得られる。

【0103】式(II)のボルフィリン単量体を溶解する非極性溶媒としては、クロロホルム、ジクロロメタン等を用いることができ、通常、その量は、化合物重量に対し100～200倍量に設定することができる。

【0104】亜鉛の塩を有機溶媒に溶解した溶液としては、酢酸亜鉛、塩化亜鉛等を、メタノール、エタノールのような有機溶媒に溶解したものをを用いることができる。添加する亜鉛の塩の量は、亜鉛に換算して、式(I)の単量体に対して、5～20倍モル用いることができる。

【0105】反応混合物は、通常、室温付近で、1～3

時間攪拌し、得られた反応溶液を水等の水性溶媒で洗浄した後、有機層を蒸発させることにより、式(III)で表される相補配位型二量体の粗生成物が得られる。

【0106】工程bにおいて、上記式(III)で表される相補配位型二量体とヨウ素を非極性溶媒に溶解し、有機溶媒に溶解したヘキサフルオロリン酸銀(I)を添加、攪拌した後、ヨウ素及びヘキサフルオロリン酸銀(I)をさらに添加し、攪拌する。反応溶液を水性溶媒で洗浄し、溶媒を除去する。残渣を酸性有機溶媒に溶解し、攪拌する。水性溶媒を添加後、有機溶媒で抽出することにより、式(IV)で表されるメソ型二量体の粗生成物が得られる。

【0107】式(III)で表される相補配位型二量体を溶解する非極性溶媒としては、クロロホルム等を、通常、化合物重量に対し500～1000倍量用いることができる。添加するヨウ素およびヘキサフルオロリン酸銀(I)は、式(III)の二量体に対して、それぞれ0.4～0.6倍モルおよび0.4～0.6倍モル用いることができる。

【0108】ヘキサフルオロリン酸銀(I)を溶解する有機溶媒としては、アセトニトリル、アセトン等を、ヘキサフルオロリン酸銀(I)の重量に対し100～200倍量用いることができる。

【0109】攪拌は、通常、室温で、1～3時間行う。

【0110】更に添加するヨウ素及びヘキサフルオロリン酸銀(I)の量は、一般式(III)の二量体に対して、それぞれ、0.4～0.6倍モル及び0.4～0.6倍モルに設定することができる。反応溶液の攪拌は、通常、1～3時間行う。

【0111】反応溶液を洗浄する水性溶媒としては、重炭酸ナトリウム水溶液及び水等を用いることができる。

【0112】洗浄後の残渣を溶解させる酸性有機溶媒としては、反応混合物のpH値を1以下にすることができるものであり、例えば、メタノール/濃塩酸(10：1)混合物等を、化合物重量に対し200～500倍量用いることができる。反応溶液は、通常、室温で、20～40分攪拌する。

【0113】得られた反応溶液に添加する水性溶媒としては、水等を用いることができ、抽出有機溶媒としては、クロロホルム等を用いることができる。

【0114】この様にして得られた式(III)のメソ型二量体の粗生成物は、必要に応じて、重炭酸ナトリウム水溶液及び水のような水性溶媒で洗浄後、クロマトグラフィー等により精製し、次の工程cに供することができる。

【0115】工程cでは、式(III)のメソ型二量体を非極性溶媒に溶解し、有機溶媒に溶解した亜鉛の塩を添加、攪拌することにより、式(e)で表されるポリ(ボルフィリン)が得られる。

【0116】工程cの反応に用いる非極性溶媒として

は、クロロホルム、ジクロロメタン等を、化合物重量に対し100～200倍量用いることができる。

【0117】この反応混合物に添加する有機溶媒に溶解した亜鉛の塩の溶液としては、酢酸亜鉛、塩化亜鉛等を、メタノール、エタノールのような有機溶媒に溶解した飽和溶液を用いることができる。添加する亜鉛の塩の量は、亜鉛に換算して、式(III)のメソ型二量体に対して、5～20倍モル用いることができる。

【0118】この反応は、通常、室温で、1～3時間攪拌することにより行い、式(e)で表されるポリ(ポルフィリン)が得られる。

【0119】一般式(2)で表されるポルフィリン金属錯体と、上述した式(e)のポリ(ポルフィリン)とを反応させ、一般式(3)の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)を得る反応は、これらの混合物をメタノールのような配位性溶媒の存在下に混合した後、この配位性溶媒の少なくとも一部を、クロロホルムのような非配位性溶媒で置換することにより行うことができる。

【0120】上記反応において、配位性溶媒の使用量及び配位性溶媒を置換すべき非配位性溶媒の割合は、式(e)のポリ(ポルフィリン)の重合度、一般式(3)における所望するnの値等に応じて適宜設定することができる。反応温度は、通常、20～30℃に、反応時間は、通常、5～10分に設定することができる。

【0121】一般式(4)で表される両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)は、上記式(f)で表されるメルカプト置換ポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)－イミダゾリルと、上記式(g)で表されるイミダゾリルポルフィリン－キノニルポルフィリン二量体を配位性溶媒非存在下に混合することにより合成することができる。

【0122】式(f)の両端にメルカプト基とイミダゾリル基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)は、以下の方法で製造することができる。

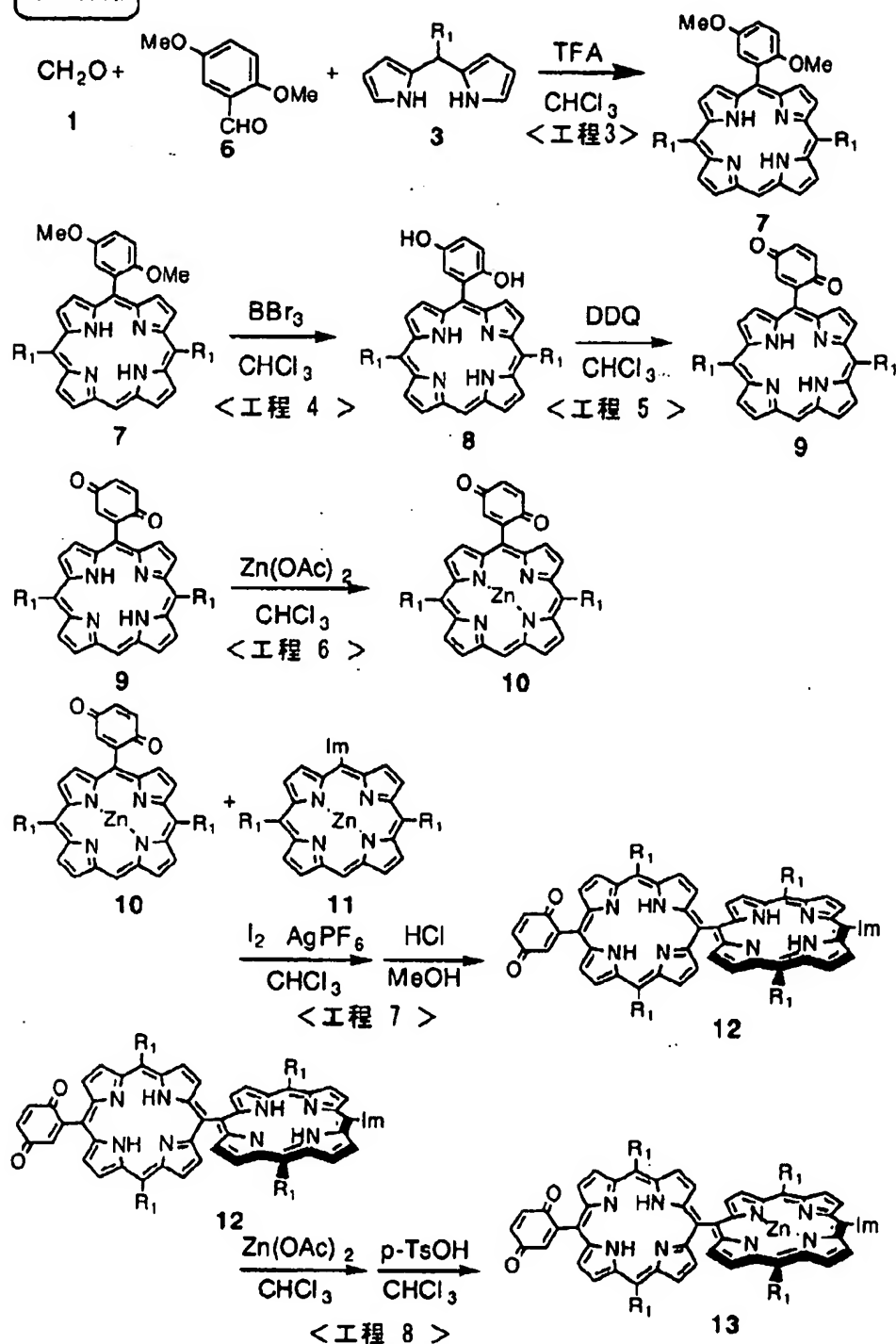
【0123】まず、一般式(2)で表されるイミダゾリルポルフィリン金属錯体二量体を配位性溶媒中で、金電極表面に結合させることによりイミダゾリルポルフィリン金属錯体修飾金電極を製造する。次に、配位性溶媒中でイミダゾリルポルフィリン金属錯体修飾金電極に、式(e)のポリ(ポルフィリン)を反応させることにより目的の式(f)の片端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルポルフィリン金属錯体)イミダゾリルを得ることができる。

【0124】式(g)のイミダゾリルポルフィリン－キノニルポルフィリン二量体は、以下に示す工程3～工程13を経て合成することができる。

【0125】

【化26】

## 合成経路



## 【0126】&lt;工程3&gt;化合物hの合成

化合物f、化合物g及び化合物c（式中 $\text{R}_1$ は上で規定したとおり。）を $\text{CHCl}_3$ あるいはアセトニトリルのような溶媒に溶解し、窒素雰囲気下に置換したあとこれにTFA（トリフルオロ酢酸）を添加し、反応させ、ポルフィリン（h）を合成する。化合物f、g及びcは、市販品を用いることができる。

【0127】化合物f、化合物g及び化合物cの添加量は、通常、1:1:2に設定することができる。

【0128】溶媒は、通常、化合物b重量に対し500～1000倍量用いることができる。

【0129】反応温度は、通常、20～30℃に設定することができる。反応時間は、通常、1～1.5時間に設定することができる。

【0130】反応後、必要に応じて精製等の工程を経て、得られた物質を次の<工程4>に供する。精製工程は、例えば、上記反応に用いた溶媒を留去した後、クロロホルム、ジクロロメタンのような溶媒に溶解し、溶液



に重炭酸ナトリウム水溶液を加え分液後、有機層を乾燥濃縮した後、シリカゲルカラムクロマトグラフィー等により行うことができる。

#### 【0131】<工程4>化合物iの合成

上記工程3で得られた化合物hを $\text{CHCl}_3$ あるいはベンゼンのような溶媒に溶解した後、三臭化ホウ素を添加し、反応させ、ボルフィリン(i)を合成する。

【0132】溶媒は、通常、化合物h重量に対し500～1000倍量用いることができる。反応温度は、通常、20～30℃に設定することができる。反応時間は、通常、2～4時間に設定することができる。

#### 【0133】<工程5>化合物jの合成

上記工程4で得られた化合物iを $\text{CHCl}_3$ あるいはベンゼンのような溶媒に溶解し、DDQを添加し、反応させ、ボルフィリン(j)を合成する。

【0134】溶媒は、通常、化合物h重量に対し500～1000倍量用いることができる。反応温度は、通常、20～30℃に設定することができる。反応時間は、通常、5～10分に設定することができる。

#### 【0135】<工程6>化合物kの合成

上記工程5で得られた化合物jを $\text{CHCl}_3$ あるいはアセトニトリルのような溶媒に溶解し、溶媒に溶解した亜鉛の塩(例えば、酢酸亜鉛)を添加、攪拌することにより、化合物kが得られる。

【0136】溶媒は、通常、化合物kに対し、500～1000倍量用いることができる。反応温度は、通常、20～30℃に設定することができる。反応時間は、通常、0.5～1時間に設定することができる。

#### 【0137】<工程7>化合物mの合成

$\text{CHCl}_3$ あるいはアセトニトリルのような溶媒に溶解した上記工程6で得られた化合物kに化合物lを添加し、有機溶媒に溶解したヘキサフルオロリン酸銀(I)を添加、攪拌する。反応溶液を水性溶媒で洗浄し、溶媒を除去する。残渣を酸性有機溶媒に溶解し、攪拌する。水性溶媒を添加後、有機溶媒で抽出することにより、化合物mが得られる。

【0138】化合物kを溶解する非極性溶媒としては、クロロホルム等を、通常、化合物重量に対し500～1000倍量用いることができる。添加するヨウ素およびヘキサフルオロリン酸銀(I)は、化合物kに対して、それぞれ0.4～0.6倍モルおよび0.4～0.6倍モル用いることができる。

【0139】ヘキサフルオロリン酸銀(I)を溶解する有機溶媒としては、アセトニトリル、アセトン等を、ヘキサフルオロリン酸銀(I)の重量に対し100～200倍量用いることができる。

【0140】攪拌は、通常、室温で、0.5～1時間行う。

【0141】反応溶液を洗浄する水性溶媒としては、重炭酸ナトリウム水溶液及び水等を用いることができる。

【0142】洗浄後の残渣を溶解させる酸性有機溶媒としては、反応混合物のpH値を1以下にすることができ、例えば、メタノール/濃塩酸(10:1)混合物等を、化合物重量に対し200～500倍量用いることができる。反応溶液は、通常、室温で、20～40分攪拌する。

【0143】得られた反応溶液に添加する水性溶媒としては、水等を用いることができ、抽出有機溶媒としては、クロロホルム等を用いることができる。

【0144】この様にして得られた化合物mは、必要に応じて、重炭酸ナトリウム水溶液及び水のような水性溶媒で洗浄後、クロマトグラフィー等により精製し、次の工程8に供することができる。

#### 【0145】<工程8>化合物nの合成

$\text{CHCl}_3$ あるいはアセトニトリルのような溶媒に溶解した上記工程7で得られた化合物mに、溶媒に溶解した亜鉛の塩(例えば、酢酸亜鉛)を添加、攪拌する。

【0146】溶媒は、通常、化合物mに対し、500～1000倍量用いることができる。反応温度は、通常、20～30℃に設定することができる。反応時間は、通常、0.5～1時間に設定することができる。

【0147】ついで、得られた化合物を水で洗浄し、溶媒を除去する。残渣を酸性有機溶媒に溶解し、攪拌する。水性溶媒を添加後、有機溶媒で抽出することにより、化合物nが得られる。

#### 【0148】

【実施例】以下に本発明の実施例を説明するが、本発明は、これらの実施例に限定されるものではない。

【0149】(実施例1)一般式(2)で表されるメルカプト置換イミダゾリルボルフィリン金属錯体二量体の合成例を記載する。

#### 【0150】工程①

5-(1-メチル-2-イミダゾリル)-15-(4-(S-アセチルチオ)フェニル)-10,20-ビス(n-ヘプチル)ボルフィリン(4)の合成

1-メチルイミダゾール-2-カルボアルデヒド(1)(27.5mg, 0.25mmol)と4-(S-アセチルチオ)ベンズアルデヒド(2)(45mg, 0.25mmol)、ジピロメタン(3)(122mg, 0.5mmol)をクロロホルム25mLに溶かし、窒素置換後、30mLのTFA(1.5当量)を加えた。室温で二時間攪拌した後、ジクロロジシアノベンゾキノン170mg(3当量)を加え1時間攪拌を続けた。重曹水で洗浄し、クロロホルムを留去後、シリカゲルカラムクロマトグラフィーで精製した(展開溶媒:クロロホルム:アセトン=10:1)。紫色固体5mg(収率2.7%)を得た。

【0151】MS (TOF) m/e 737.4 (M+1)、計算値737.39 (M+1);  $I_{\text{obs}}$  ( $\text{CHCl}_3$ ) 418.5, 516.5, 550.5, 591, 649.5 nm;  $^1\text{H NMR}$  (d:  $\text{CDCl}_3$ ) -2.67(NH, s, 2H), 0.88( $\text{CH}_3$ , t), 1.32( $\text{CH}_2$ , m), 2.49( $\text{CH}_2$ , m), 2.63( $\text{CH}_3$  (S-acetyl), s, 3H), 3.40( $\text{CH}_2$  (im), s, 3H), 4.95( $\text{CH}_2$ , m), 7.4

8(im-4, s, 1H), 7.68(im-5, s, 1H), 7.80(phenyl, d, 1H), 7.81(phenyl, d, 1H), 8.16(phenyl, d, 1H), 8.27(phenyl, d, 1H), 8.78(d, 2H), 8.87(d, 2H), 9.41(d, 2H), 9.45(d, 2H)。

#### 【0152】工程②

5-(1-メチル-2-イミダゾリル)-15-(4-(S-アセチルチオ)フェニル)-10,20-ビス(n-ヘプチル)ポルフィリン亜鉛錯体(5)の合成

(4)(5mg, 6.8mmol)をクロロホルム0.5mLに溶かし、飽和酢酸亜鉛メタノール溶液0.2mLを加え室温で2時間撹拌した。反応溶液を水で洗浄し溶媒を留去した。収量4m

g。

【0153】MS (TOF) m/e 799.5 (M+1), 計算値799.31 (M+1);  $I_{abs}$  (CHCl<sub>3</sub>) 414, 438, 567, 621.5 nm; <sup>1</sup>H NMR (d: CDCl<sub>3</sub>) 0.88(CH<sub>2</sub>, m, 4H), 1.00(CH<sub>3</sub>, t, 6H), 1.50(CH<sub>2</sub>, m), 1.66(CH<sub>3</sub>(im), s, 3H), 1.78(CH<sub>2</sub>, m, 4H), 2.04(CH<sub>2</sub>, m, 4H), 2.11(im-4, s, 1H), 2.68(CH<sub>3</sub>(S-acetyl), s, 3H), 2.80(CH<sub>2</sub>, m, 4H), 5.09(CH<sub>2</sub>, m, 4H), 5.41(d, 2H), 5.51(im-5, s, 1H), 7.81(phenyl, d, 1H), 7.98(phenyl, d, 1H), 8.19(phenyl, d, 1H), 8.72(phenyl, d, 1H), 8.89(d, 2H), 9.04(d, 2H), 9.58(d, 2H)。

【0154】(実施例2)式(g)で表されるイミダゾリルポルフィリン-キノニルポルフィリン二量体の合成例を以下に示す。

#### 【0155】工程③

5-(2,5-ジメトキシフェニル)-10,20-ビスヘプチルポルフィリン(7)の合成

ホルムアルデヒド(1)(320 mg, 8 mmol)と2,5-ジメトキシベンズアルデヒド(6)(166 mg, 1 mmol)、ジピロメタン(3)(976 mg, 4 mmol)をクロロホルム200mLに溶かし、窒素ガス置換後、トリフルオロ酢酸80  $\mu$ L (0.5当量)を加えた。室温で撹拌を行ない、70分後、ジクロロジシアノベンゾキノン1.35 g (3当量)を加え1時間撹拌を続けた。重曹水で洗浄し、クロロホルムを留去後、シリカゲルカラムクロマトグラフィーで精製した(展開溶媒: CHCl<sub>3</sub>/hexane=3:1)。紫色固体43.4 mgを得た。収率6.8 %。

【0156】MS (TOF) m/e 643.2 (M+1), 計算値643.39 (M+1); 紫外可視吸収スペクトル (CHCl<sub>3</sub>)  $\lambda_{max}$  414.5, 512.5, 546.5, 587.5, 643.5 nm; 蛍光スペクトル (CHCl<sub>3</sub>)  $\lambda_{max}$  646, 713 nm ( $\lambda_{ext}$  414 nm); <sup>1</sup>H NMR ( $\delta$ : CDCl<sub>3</sub>) -2.80(NH, s, 2H), 0.85(CH<sub>3</sub>, t), 1.32(CH<sub>2</sub>, q), 2.49(CH<sub>2</sub>, q), 3.49(OCH<sub>3</sub>, s, 3H), 3.92(OCH<sub>3</sub>, s, 3H), 4.95(CH<sub>2</sub>, m), 7.25(Ar, s), 7.31(Ar, d, 1H), 7.60(Ar, d, 1H), 8.88(13, 17, d, 2H), 9.33(2, 8, d, 2H), 9.40(12, 18, d, 2H), 9.50(3, 7, d, 2H), 10.04(15, s, 1H)。

#### 【0157】工程④

5-(2,5-ジヒドロキシフェニル)-10,20-ビスヘプチル

ポルフィリン(8)の合成

原料の化合物(7)の20.5 mg (31.9  $\mu$ mol)を2 mLのクロロホルムに溶解し、窒素雰囲気下0.2 mLのBBr<sub>3</sub>をシリンジを使って加えた。室温で3時間撹拌し、クロロホルムで希釈後メタノールを少しずつ加えて過剰のBBr<sub>3</sub>を分解した。重曹水で中和後水で洗い、溶媒を除去し乾燥した。17.1 mg、収率87 %。MS (TOF) m/e 615.4 (M+1), 計算値615.36 (M+1)。

#### 【0158】工程⑤

5-(2,5-ジヒドロキシフェニル)-10,20-ビスヘプチルポルフィリン(9)の合成

原料の化合物(8)の17.1 mg (27.8  $\mu$ mol)を1 mLのクロロホルムに溶解し、ジクロロジシアノベンゾキノン20.0 mg (3当量)を加え、室温で5分撹拌した。反応溶液をそのままシリカゲルカラムクロマトグラフィーにかけた(展開溶媒: CHCl<sub>3</sub>)。14.0 mg、収率82 %。MS (TOF) m/e 613.2 (M+1), 計算値613.35 (M+1); 紫外可視吸収スペクトル (CHCl<sub>3</sub>)  $\lambda_{max}$  411, 508, 586 nm; 蛍光スペクトル (CHCl<sub>3</sub>)  $\lambda_{max}$  644, 710 nm ( $\lambda_{ext}$  411 nm)。

#### 【0159】工程⑥

5-(2,5-ジヒドロキシフェニル)-10,20-ビス(n-ヘプチル)ポルフィリン亜鉛錯体(10)の合成

原料の化合物(9)の14.0 mg (22.8  $\mu$ mol)をクロロホルム1 mLに溶解させ、飽和酢酸亜鉛メタノール溶液0.3 mLを加え室温で30分撹拌した。クロロホルム溶液を水で洗浄し、溶媒留去した。14.6 mg (収率95%)。

【0160】MS (TOF) m/e 675.0 (M+1), 計算値675.26 (M+1); 紫外可視吸収スペクトル (CHCl<sub>3</sub>)  $\lambda_{max}$  417, 546.5 nm; 蛍光スペクトル (CHCl<sub>3</sub>)  $\lambda_{max}$  595, 640 nm ( $\lambda_{ext}$  411nm)。

#### 【0161】工程⑦

15-(1-メチル-2-イミダゾリル)-15'-(2,5-ジヒドロキシフェニル)-10,10',20,20'-テトラキス(n-ヘプチル)-5,5'-ビスポルフィリン(12)の合成

化合物(10)(14.6 mg, 21.6  $\mu$ mmol)と5-(1-メチル-2-イミダゾリル)-10,20-ビス(n-ヘプチル)ポルフィリン亜鉛錯体(11)(83 mg, 127.7  $\mu$ mmol)をクロロホルム36mLに溶かし、ヨウ素(18.9 mg, 74.7  $\mu$ mmol)、AgPF<sub>6</sub>(18.8 mg, 74.7  $\mu$ mmol: アセトニトリル1mLに溶かしたもの)を加え、室温で10分撹拌した。MALDI-TOFマスとTLCにより原料の消失と生成物の生成を確認し、クロロホルム溶媒を重曹水、水で洗浄後、減圧留去し、残渣をメタノール-濃塩酸(10:1)11mLに溶解させ、室温で30分撹拌した。水を加えてクロロホルムで抽出を行なった。乾燥、減圧留去後得られた粗生成物をシリカゲルカラムクロマトグラフィーで精製した(展開溶媒: CHCl<sub>3</sub>/アセトン=10:1)。収量 5 mg (35 %)。

【0162】MS (TOF) m/e 1199.7 (M+1), 計算値1197.7 (M+1); 紫外可視吸収スペクトル (CHCl<sub>3</sub>)  $\lambda_{max}$  412, 452, 523.5, 598 nm; 蛍光スペクトル (CHCl<sub>3</sub>)  $\lambda_{max}$  66

0, 726 nm ( $\lambda_{\text{ext}}$  412 nm);  $^1\text{H NMR}$  ( $\delta$ :  $\text{CDCl}_3$ ) -2.09(NH, s, 4H), 0.83( $\text{CH}_3$ , t, 12H), 1.27( $\text{CH}_2$ , br, 16H), 1.45( $\text{CH}_2$ , br, 8H), 1.73( $\text{CH}_2$ , br, 8H), 2.50( $\text{CH}_2$ , br, 8H), 3.53( $\text{CH}_3$  (Im), s, 3H), 4.90( $\text{CH}_2$ , br, 8H), 7.36(Ar, d, 2H), 7.68(Ar, s, 1H), 7.75(Im-5, s, 1H), 7.95-8.05( $\beta$ 位, m, br, 4H) 8.13( $\beta$ 位, d, br, 1H), 8.90( $\beta$ 位, d, 2H), 9.10( $\beta$ 位, m, br, 6H), 9.52( $\beta$ 位, d, br, 4H).

#### 【0163】工程③

15-(1-メチル-2-イミダゾリル)-15'-(2,5-ジヒドロキシフェニル)-10,10',20,20'-テトラキス(n-ヘプチル)-5,5'-ビスボルフィリンモノ亜鉛錯体(13)の合成化合物12の1.5 mgをクロロホルム0.2 mLに溶かし、飽和酢酸亜鉛メタノール溶液0.05 mLを加え、室温で30分間攪拌した。水で洗浄し、溶媒留去した。

【0164】残渣をクロロホルム0.2 mLに溶かし、0.05 mol/Lのp-トルエンスルホン酸のクロロホルム溶液を0.0484 mL (2当量)加えた。重曹水、次いで水で洗浄した。1.6 mg、収率100%。MS (TOF) m/e 1259.6(M+1), 計算値1259.62 (M+1); 紫外可視吸収スペクトル ( $\text{CHCl}_3$ )  $\lambda_{\text{max}}$  416, 456, 561.5 nm; 蛍光スペクトル ( $\text{CHCl}_3$ )  $\lambda_{\text{max}}$  664, 725 nm ( $\lambda_{\text{ext}}$  416 nm)。

【0165】(測定例1)一般式(3)の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)において、中心金属Mとイミダゾリル基の窒素原子との配位結合が、配位性溶媒の存在下に解離し、配位性溶媒非存在下に結合することを確認した。

【0166】図1は、分子量が10万を頂点に50万まで分布する式(e)のポリ(ボルフィリン)と本発明の一般式(2)で表されるアセチルチオフェニル-イミダゾリルボルフィリン亜鉛錯体二量体をエタノールを含まないクロロホルム中55:1の比で混合した溶液のクロマトグラムである。なお検出波長である415 nmの吸光係数が両者で異なるためピーク強度比は混合比を反映していない。

【0167】図2は、上記混合物の溶液にメタノールを加えた後に溶媒を除去し、エタノールを含まないクロロホルムに再溶解してから測定したクロマトグラムである。

【0168】図1のようにクロロホルム中で混合しただけでは両者を単に分離して検出しており、安定な相補的亜鉛-イミダゾール結合は解裂・再組織化を行わないことを示した。しかし、メタノールで処理した後の図2のクロマトグラムでは分子量が4万以上のポリ(ボルフィリン)はほとんど消失し、nが0から7までの長さの異なる電線が分離して検出され分子鎖長を制御できることが示された。これらは容易にそれぞれの長さのものへ単離が可能であり、図1で示されたようにクロロホルム中においては安定な単一化合物として扱え、またメタノールの処理によって別の分子鎖長へ変換することも可能であるこ

とを示している。

#### 【0169】

【発明の効果】上述のように本発明によれば、一般式(1)で表されるイミダゾリルボルフィリン金属錯体単量体が提供される。この単量体の金属原子に他の単量体のイミダゾリル基の窒素原子を配位させ、ボルフィリン間の架橋を行なうことにより、一般式(2)で表されるイミダゾリルボルフィリン二量体が得られる。一般式(3)で表される両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)は、一般式(2)の二量体を構成単位とする重合体であって、その両端にアセチルチオ基を有するものである。また、一般式(4)の両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)は、一般式(2)の二量体を構成単位とする重合体であって、その一端にアセチルチオ基を有し、他端にキノニル基を有するものである。一般式(2)の二量体において、金属原子とイミダゾリル基の窒素原子との配位結合は、メタノールの添加によって結線、断線することができる。このような二量体を構成単位とする本発明の一般式(3)の両端にメルカプト基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)及び一般式(4)の両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)は、長さを制御したサブミクロン鎖長の分子電線としての利用が期待される。また、光励起エネルギーが流れる電線部分ともなる。さらに、両端のアセチルチオ基は、金電極と結合し、強いAu-S結合を形成することができるので、光電デバイス、あるいは電子伝達媒体、エネルギー伝達媒体として利用することができる。

【0170】特に、本発明の一般式(4)で表される両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)は、その一方の末端に有するキノニル基が電子受容体である。したがって、そのポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)の連鎖において電子移動を可能にし、さらに、光合成反応中心、すなわちアンテナ錯体⇒スペシャルペア⇒フェオフィチン⇒キノンへのエネルギー・電子移動の機能を再現することができる。したがって、本発明の一般式(4)で表される両端にメルカプト基、キノニル基を有するポリ(イミダゾリルボルフィリン金属錯体)は、人工光合成の構築への応用が期待される。

【0171】またこのような光励起による電子移動の応用として太陽電池の材料が挙げられる。本発明のように、多量組織体による電線の末端の片方をチオール基を介して金電極に結合させ、ボルフィリン部を光励起すると多量組織体の電線がキャリアーとなり電流が流れると考えられ、効率の良い新規な太陽電池へ期待される。

#### 【図面の簡単な説明】

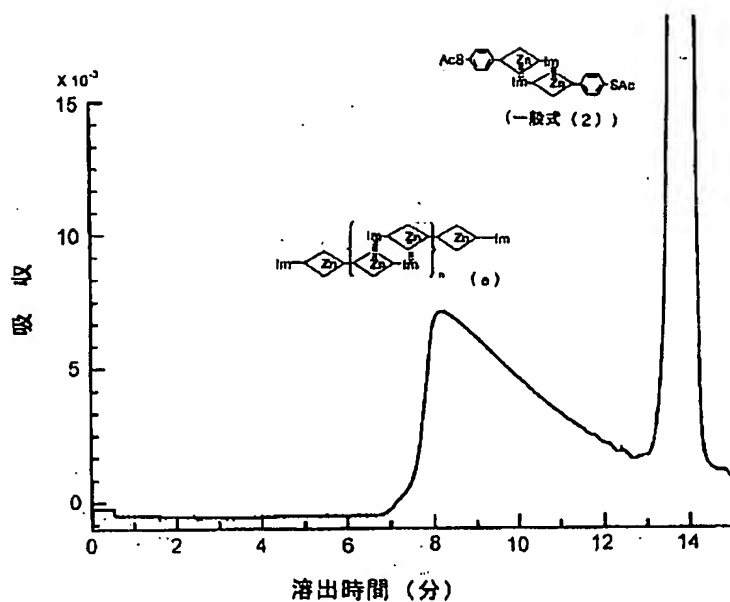
【図1】図1は、分子量が10万を頂点に50万まで分布する式(e)のポリ(ボルフィリン)と本発明の一般式(2)

で表されるアセチルチオフェニルイミダゾリルポルフィリン亜鉛錯体二量体をエタノールを含まないクロロホルム中55:1の比で混合した溶液のクロマトグラムである。

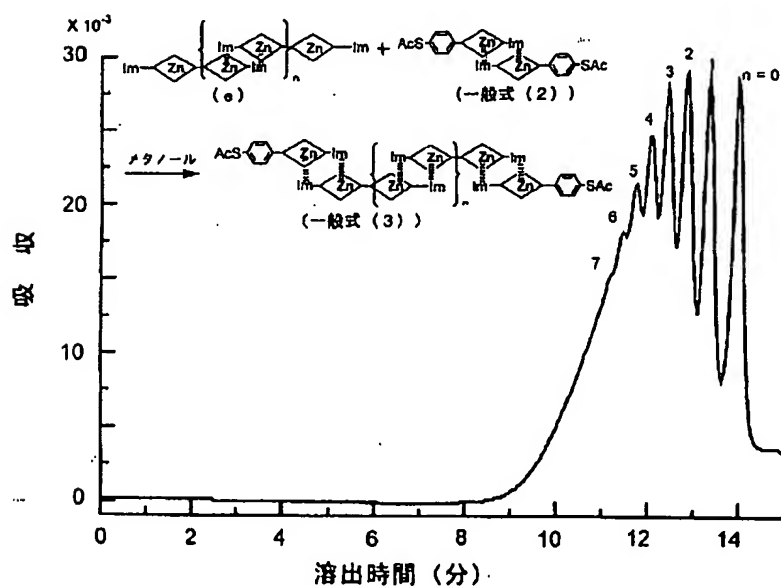
【図2】図2は、分子量が10万を頂点に50万まで分布す

る式(e)のポリ(ポルフィリン)と本発明の一般式(2)で表されるアセチルチオフェニルイミダゾリルポルフィリン亜鉛錯体二量体をメタノールを加えた後に溶媒を除去し、エタノールを含まないクロロホルムに再溶解してから測定したクロマトグラムである。

【図1】



【図2】



フロントページの続き

Fターム(参考) 4C050 PA04 PA05 PA07  
4J030 CA03 CB14 CC04 CC05 CC30  
CD11 CE02 CG02  
5F051 AA14